

第五篇 直流电机之

第十六章

直流电机的基本原理和电磁关系

授课教师：花为

东南大学电气工程学院电机与电器系

Email: huawei1978@seu.edu.cn

http://ee.seu.edu.cn/te_187.htm

第十六章

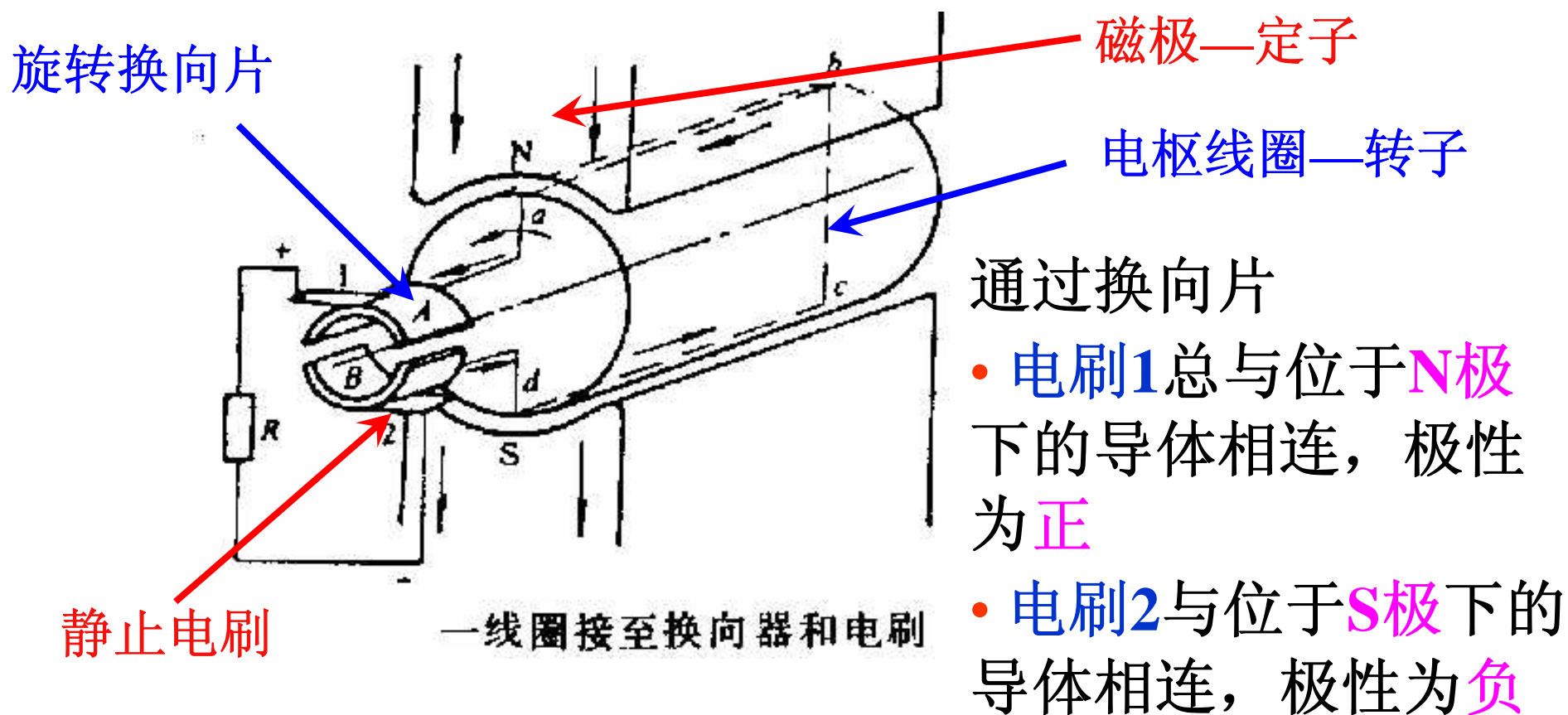
直流电机的基本原理和电磁关系

- 直流电机的工作原理
- 直流电机的基本结构
- 直流电枢绕组
- 直流电机的磁场和电枢反应
- 电枢绕组的感应电动势和电压、功率平衡方程式
- 电枢绕组的电磁转矩和转矩平衡方程式

0. 直流电机的工作原理

➤ 旋转电枢式的直流电机

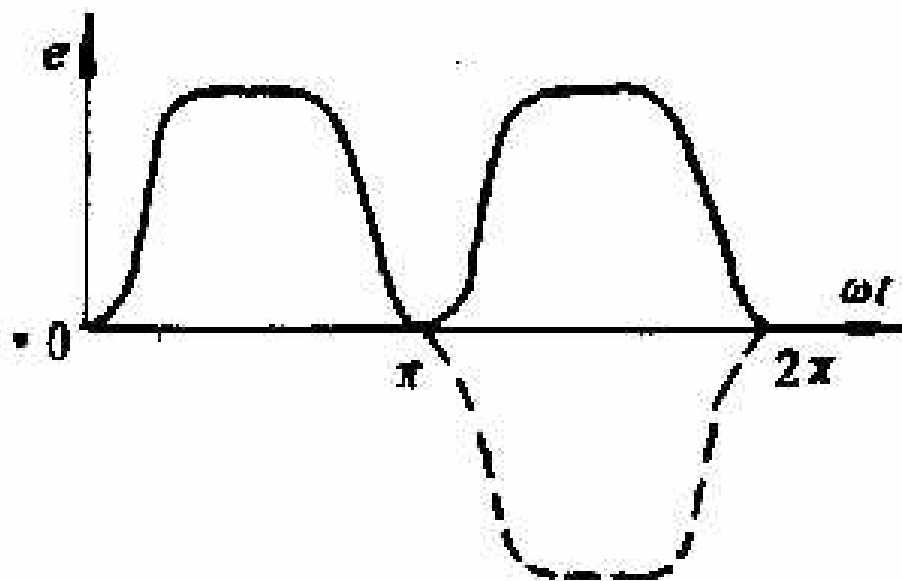
— 电枢旋转、磁极固定，带有换向器



0. 直流电机的工作原理

单线圈导体的感应电势

电刷 **1、2** 间的电势 e_{12} 为一含有很大脉动分量的直流电势，如单相全波整流一样：电势和电流脉动的很大

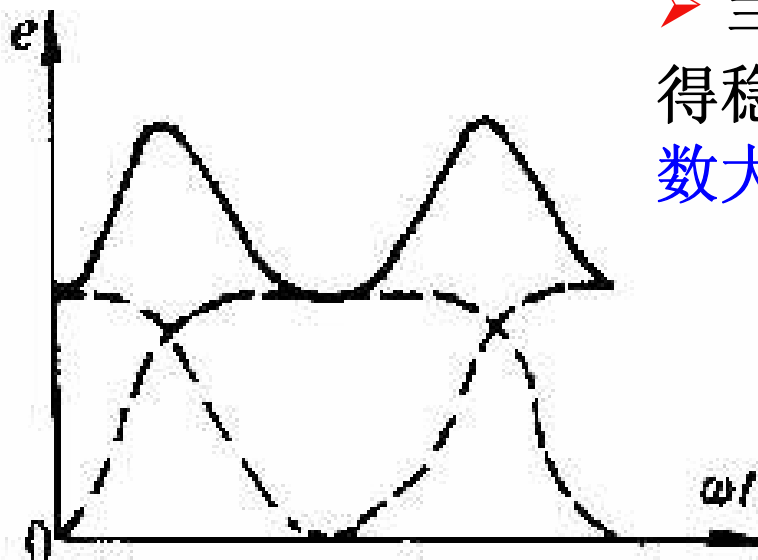


一线圈中的感应电势的换向

0. 直流电机的工作原理

两线圈串联后的合成电势

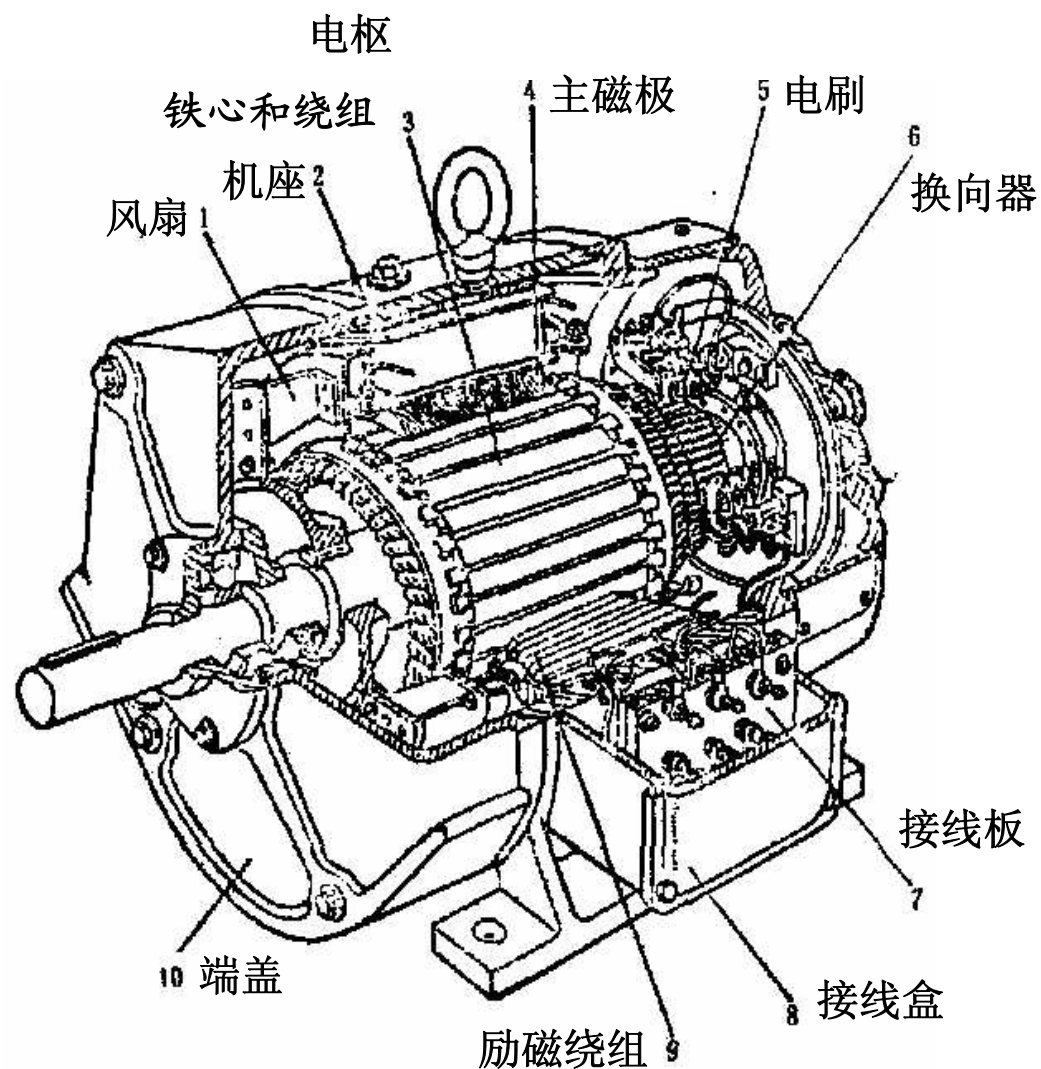
- 与原有线圈相距 90° 电角度再设置一个线圈，其两端各接有换向片，并与原有换向片A、B相距 90° 电角度，换向器包含4片换向片，相邻换向片间各相距 90° 电角度；
- 当电枢旋转时，两个线圈的感应电势在时间相位上相距 90° 电角度；



- 当有足够多的线圈和换向片时，可获得稳定直流电势。若电机每极下的导体数大于8，电势脉动幅度可小于1%。

直流发电机实质是带换向器的交流发电机

1. 直流电机的基本结构



1. 直流电机的基本结构

定子（固定部分）

- 主磁极
- 换向极
- 机座
- 端盖
- 轴承
- 电刷装置

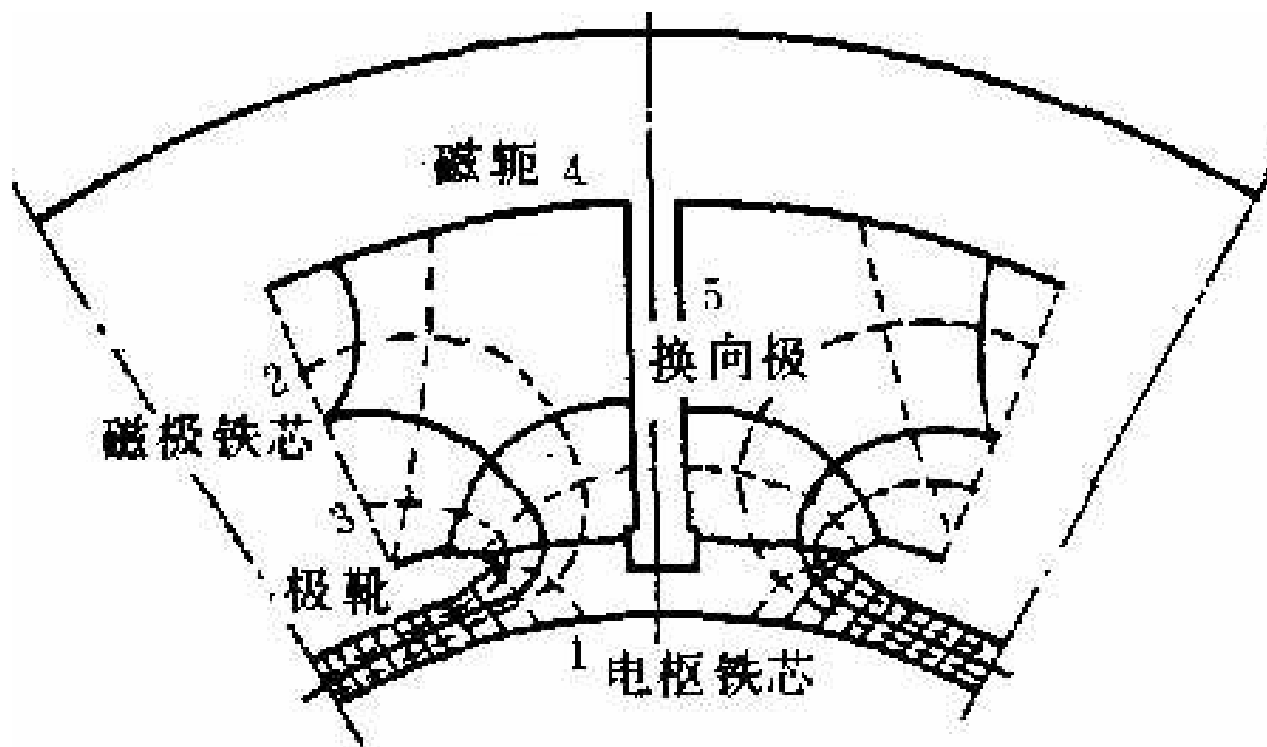
产生磁场、电机的机械支撑

转子（转动部分）

- 电枢铁心
- 电枢绕组
- 换向器
- 轴
- 风扇

感应电势，实现能量转换

1. 直流电机的基本结构



1. 电枢铁心

- 由**0.5mm**厚的硅钢片叠装而成，用作磁路及嵌放电枢绕组
- 铁芯外缘均匀冲有槽和齿。电枢绕组元件嵌入槽中，用槽楔固定

1. 直流电机的基本结构

2. 磁极铁心

由1~1.5mm厚的钢片叠成，与励磁线圈一起固定在磁轭上。
极靴表面沿圆周的长度称为极弧，二个相邻磁极上沿空气隙圆周表面的距离称为极距，极弧与极距比为极弧系数，约0.6~0.7。

3. 极靴

极靴较磁极极芯向外引伸，使空气隙中的磁通密度沿圆周变化时较为缓渐而均匀，有利于固定励磁线圈。

由于齿槽效应，表面磁通变化引起涡流损耗，极靴由叠片制成

4. 磁轭

在磁极外围将磁路闭合的部分，磁轭和底座相连，其中磁通不变（当直流励磁电流不变时），由铸钢构成

5. 换向极磁路

换向极，是位于两个主磁极之间的小磁极，用于改善换向。换向极常用整块钢或厚钢板制成，换向极的数目一般与主磁极相等。

1. 直流电机的基本结构

- 励磁绕组 套在磁极铁芯上。
并励绕组：和电枢绕组并联
串励绕组：和电枢绕组串联
- 电枢绕组 嵌在电枢铁芯槽中
叠绕组和波绕组
- 换向极绕组 与电枢绕组串联，激励换向极磁通。
- 换向器 将电枢绕组内部的交流电势用机械换接的方法转换为电刷间的直流电势。

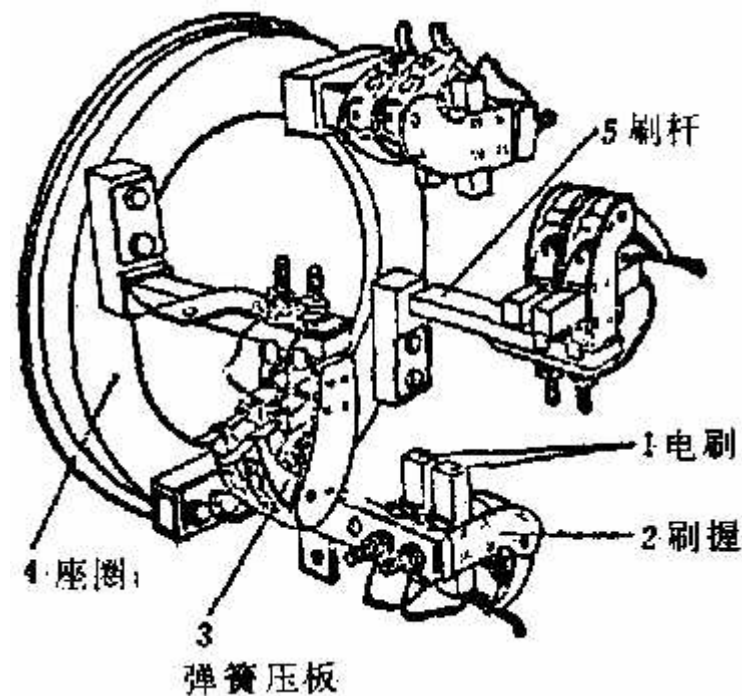
1. 直流电机的基本结构

电刷装置

电枢电流能经**旋转**的**换向器**（随**转子**）通过**静止**的**电刷**（固定在**定子**上）接通外电路

1. 将转动的电枢与外电路相连
2. 与换向器配合作用而获得直流电压

电刷组数一般等于电机极对数

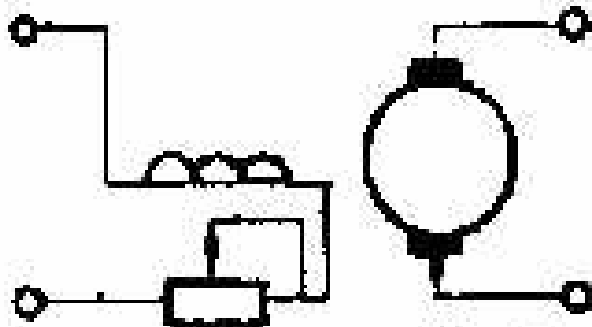


1. 直流电机的基本结构

直流电机的励磁方式

直流电机励磁方式，即励磁绕组与电枢绕组的连接方式，对电机的运行特性有大的影响

➤ 他励：励磁由另外独立的直流电源供给，与电枢绕组不连接

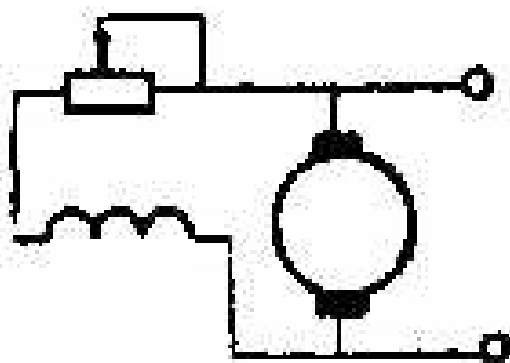


➤ 自励：励磁绕组与电枢绕组按一定的规律连接。直流发电机中，励磁电流由发电机本身提供；直流电动机中，励磁电流和电枢电流同由一个直流电源提供。

1. 直流电机的基本结构

自励的形式

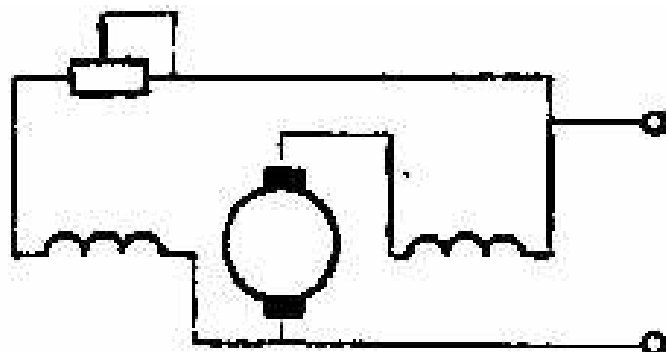
励磁回路的功率占总功率的**1%~5%**



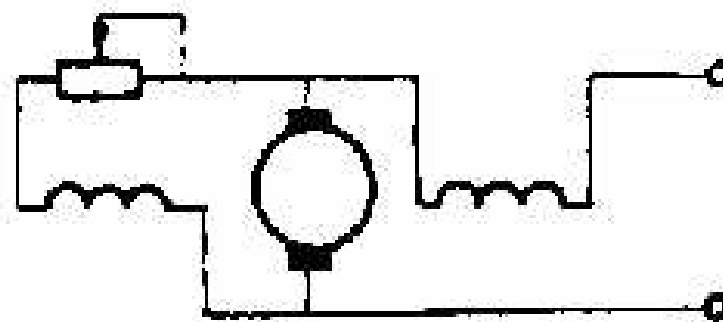
并励



串励



复励（长分接法）



复励（短分接法）

2. 直流电枢绕组

- 作用：电枢绕组，又称功率绕组。

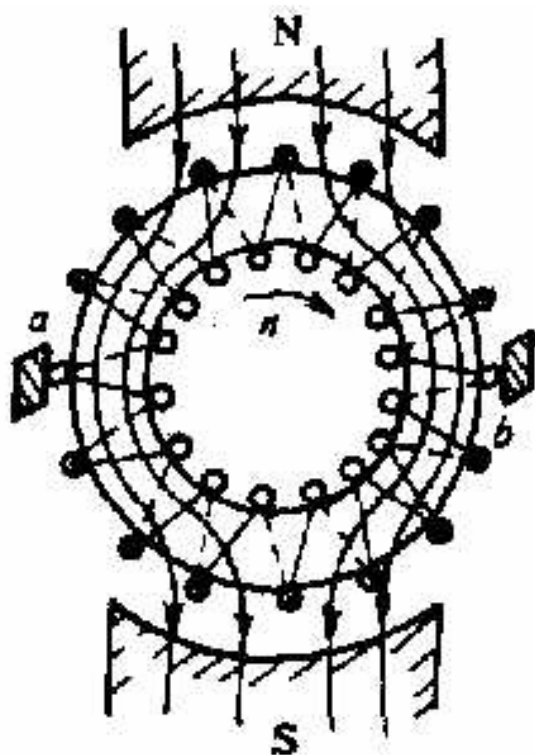
当电枢绕组在磁场中旋转时将感应电势，当电枢绕组中流通电流时，电流和气隙磁场相互作用将产生电磁转矩。通过电枢绕组，直流电机进行电功率和机械功率的转换。

- 特点：直流绕组是闭合绕组。

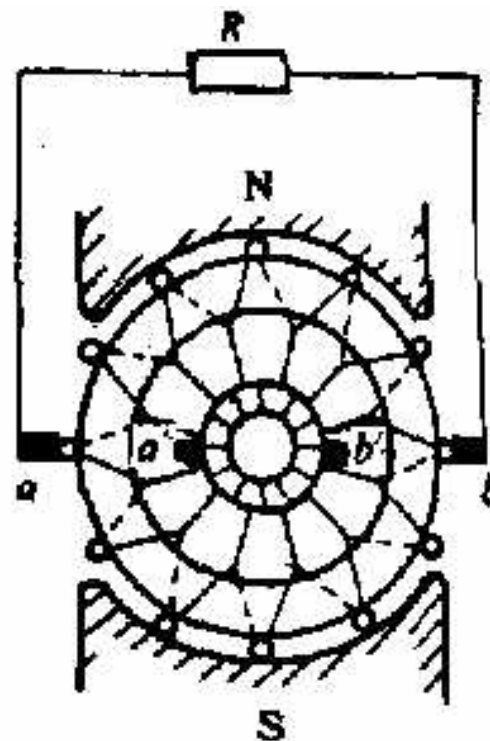
每个元件的两端点分别连接在两换向片上，每个换向片连接两个元件，各元件依一定规律依次连接，形成闭合回路。

2. 直流电枢绕组

用环型绕组说明直流绕组的闭合情况



(a) 环型电枢



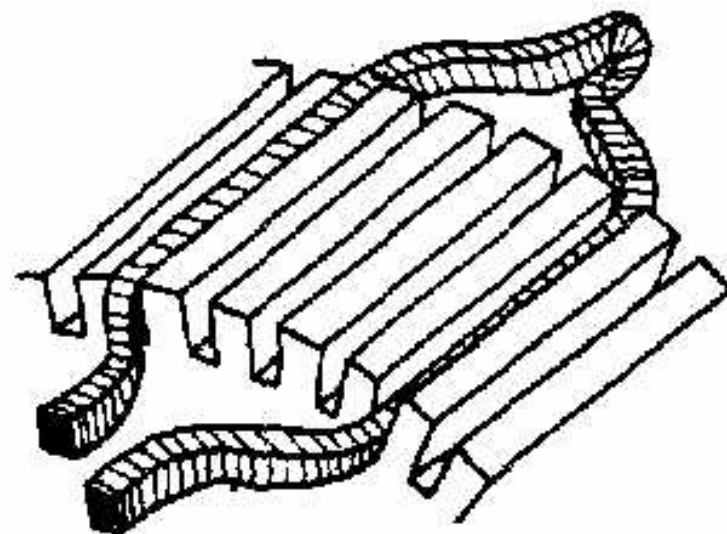
(b) 用换向器

电枢旋转时，各线圈依次通过电刷作为引出端

2. 直流电枢绕组

双层绕组

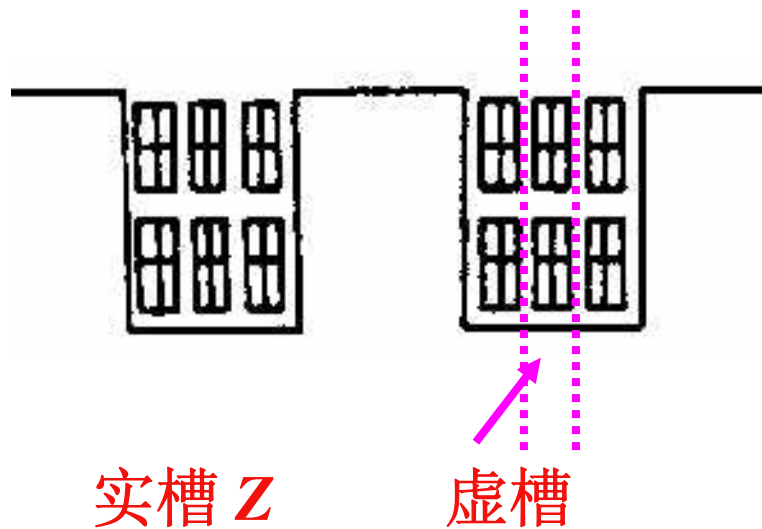
- 线圈的两边都在电枢铁芯表面的槽中：两边都能切割磁场而产生感应电势。
- 两边电势相加：线圈的两边必须处于不同极性的极面下，**线圈的跨距约等于一个极距。**
- 线圈对称排列：当一线圈的一个边在某槽中占有上层位置时，则该线圈的另一边必须放在另一槽下层。



2. 直流电枢绕组

虚槽概念

在大型电机中、每层可能有 N 个并列圈边。为了改善电机的性能，用更多的元件组成电枢绕组。但电枢铁心不能开太多的槽，采用在每槽的上下层各放置若干元件边。



实槽 Z

虚槽

$$Z_e = Z \cdot C$$

每层有3个圈边， $C=3$

每一元件有两个圈边，每一换向片上接有两个圈边，每一虚槽内放置有两个圈边

→ 元件数 S 等于换向片数 K ，也等于虚槽数 Z_e

$$S = K = Z_e$$

每线圈有 N_c 匝，则总导体数 N

$$N = 2 C N_c Z = 2 N_c Z_e$$

2. 直流电枢绕组

直流绕组的节距

- 第一节距 y_1 : 一个线圈两个圈边之间的距离, 表示元件的宽度, 通常用虚槽数表示

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \varepsilon$$

$\varepsilon = 0$ 整距; $-\varepsilon$ 短距; $+\varepsilon$ 长距

- 第二节距 y_2 : 联至同一换向片的两个圈边之间的距离
- 合成节距 y : 相串联的两个元件的对应圈边在电枢表面的跨距

$$y = y_1 + y_2$$

对叠绕组, y_2 取负; 对波绕组, y_2 取正

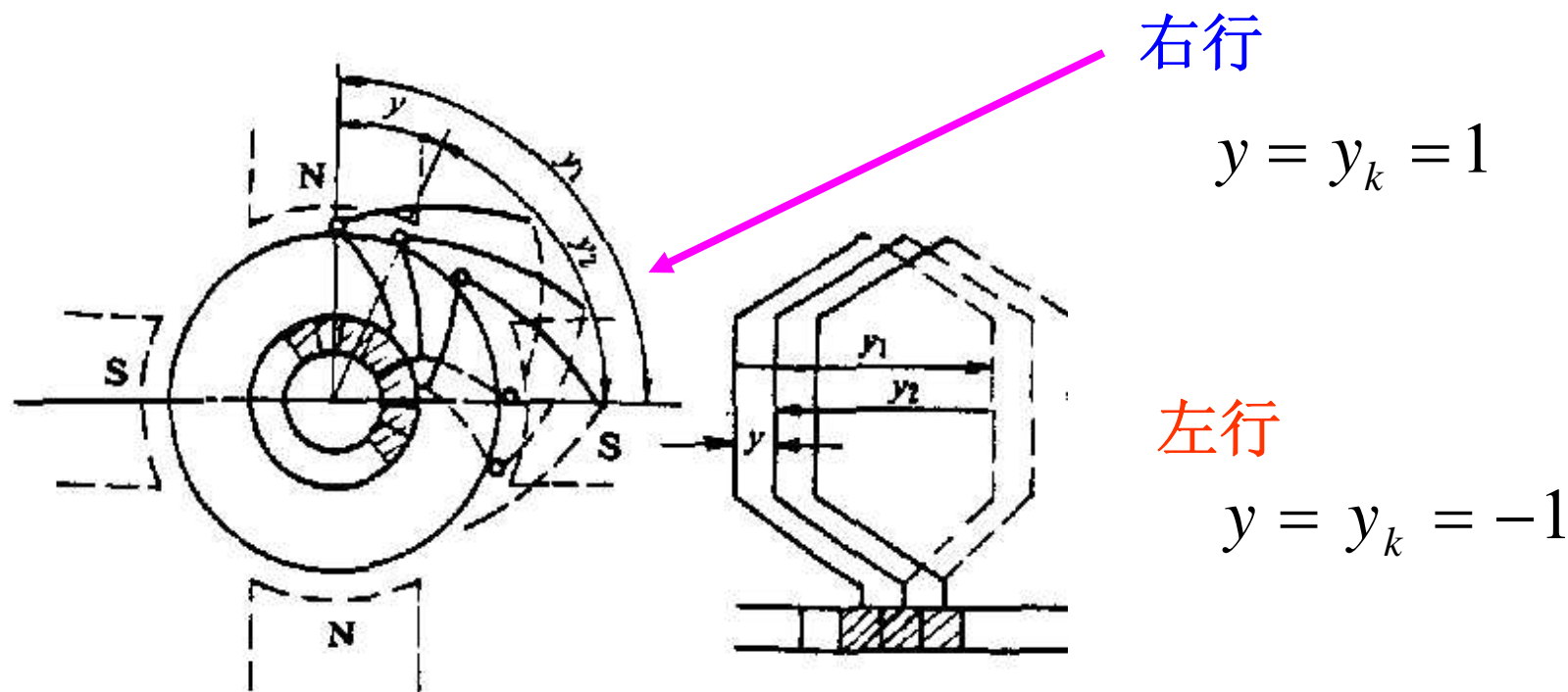
- 换向器节距 y_k : 每一线圈两端所连接的换向片之间在换向器表面的跨距, 用换向片数表示

$$y_k = y$$

2. 直流电枢绕组

1. 单叠绕组

- 每个元件出线端依次连在相邻的换向片上，后一个绕组元件相对前一个绕组元件仅移过一个槽。



单叠绕组连接规律示意图

例：绕组20虚槽，四极，双层

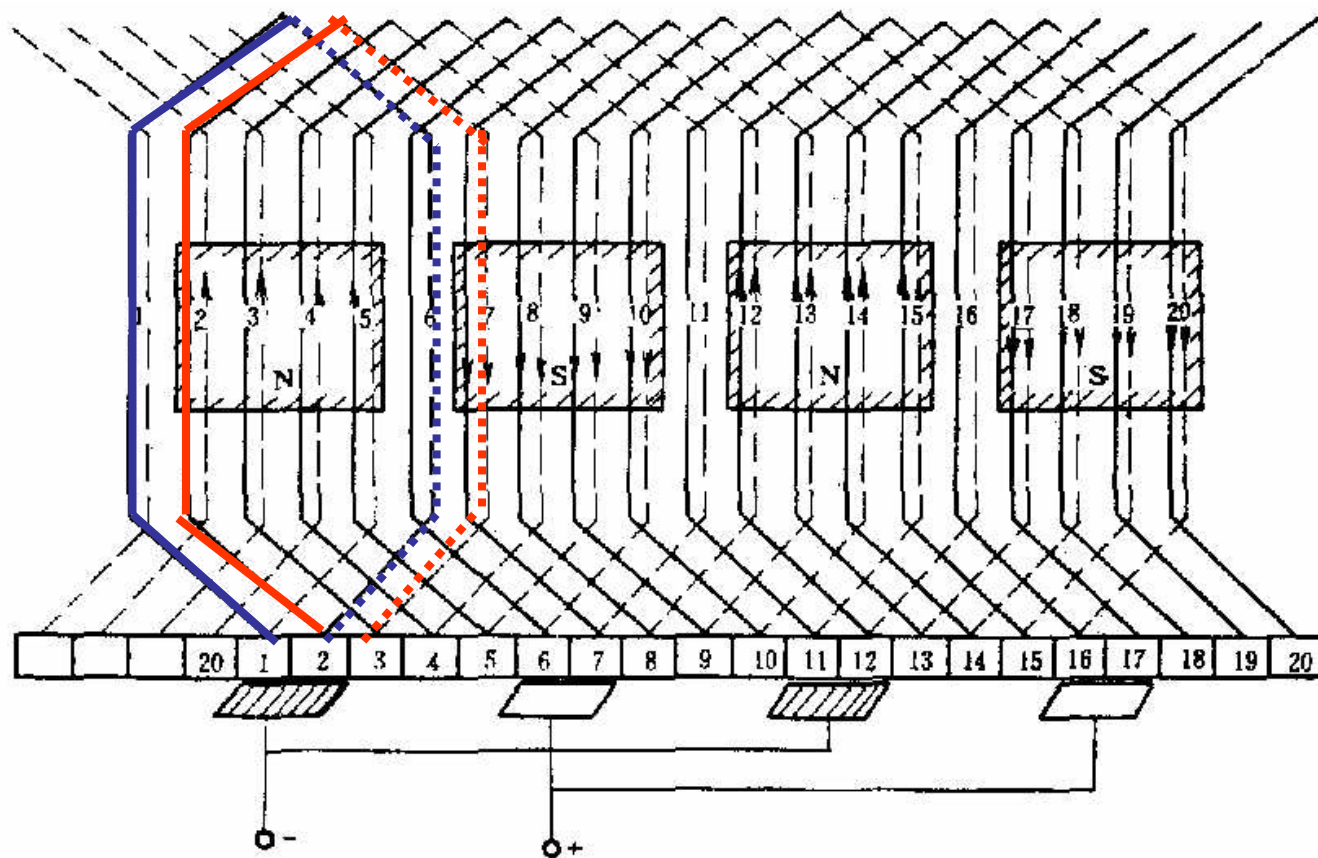
单叠右行 $y = y_k = 1$

第一节距 $y_1 = \frac{Ze}{2p} \pm \varepsilon = \frac{20}{4} = 5$

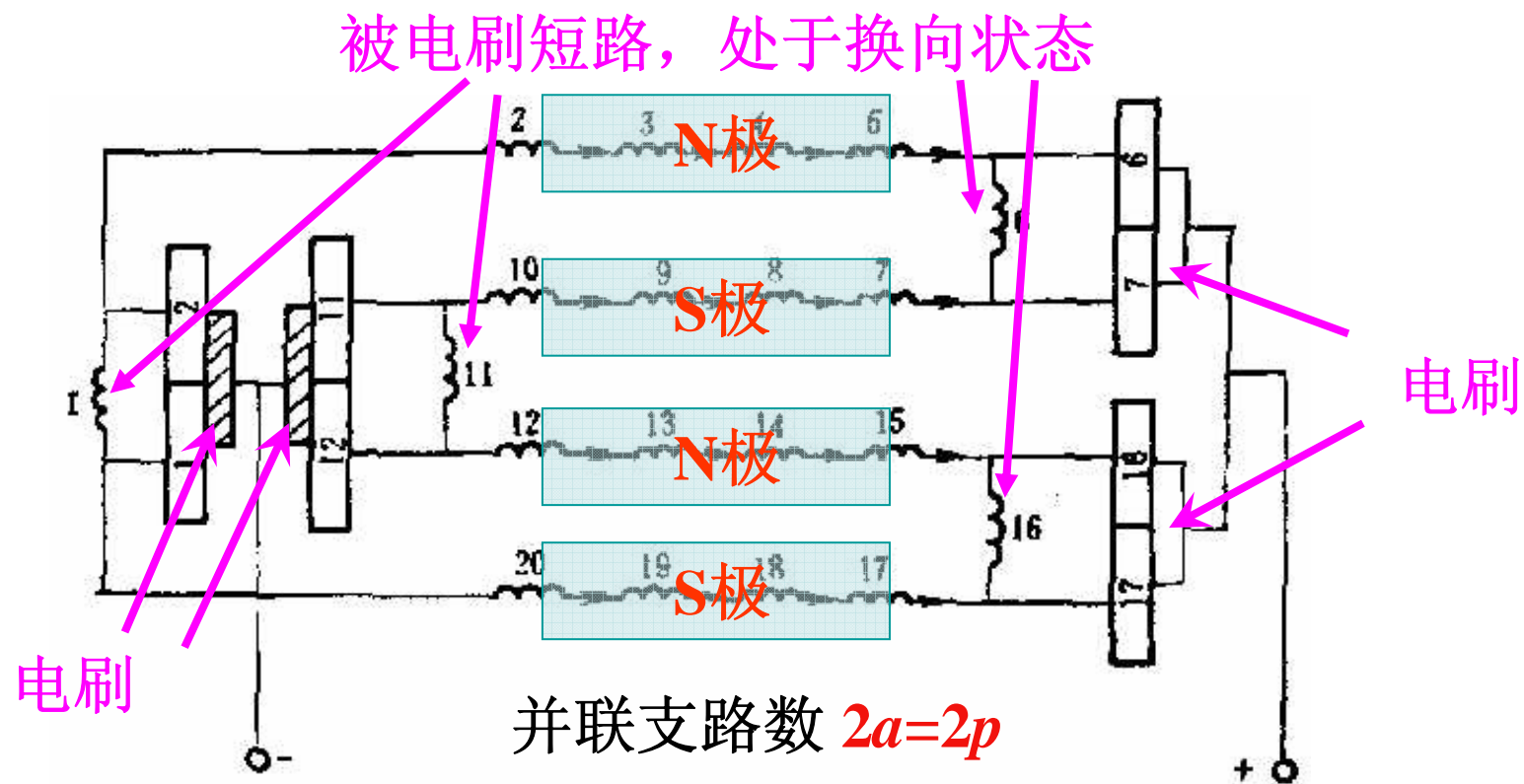
第二节距 $y_2 = y - y_1 = 5 - 1 = 4$

由右手定则判电流方向在电枢几何中心线上的元件边感应电势为0

磁极均匀分布在绕组上，电刷的中心线对着磁极中心线

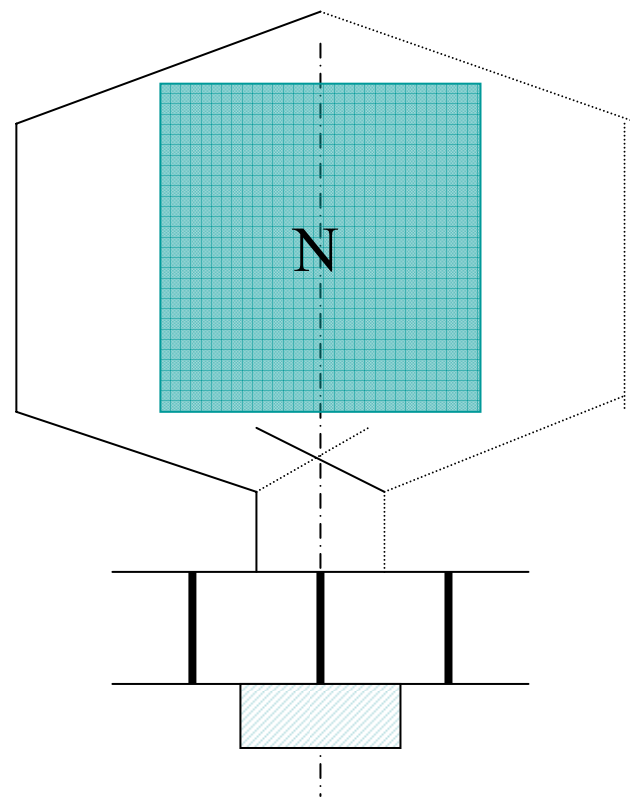


- 直流绕组是闭合绕组
- 每一极面下的元件串联成一支路
- 每支路中一个元件被电刷短路，处于换向状态中
- 在整个闭合回路中，感应电势总和为0，绕组内部无环流
- 电刷数等于极数。同极性的电刷连接形成一个“极”
- 电刷之间的引出电势为每一支路元件的电势和 $I_a = 2ai_a$



电刷放置法

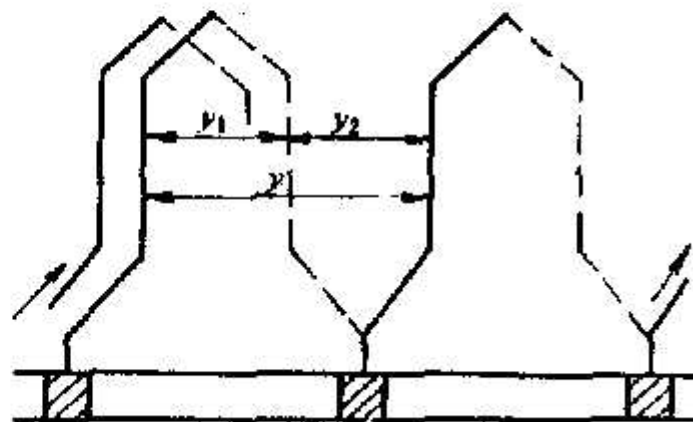
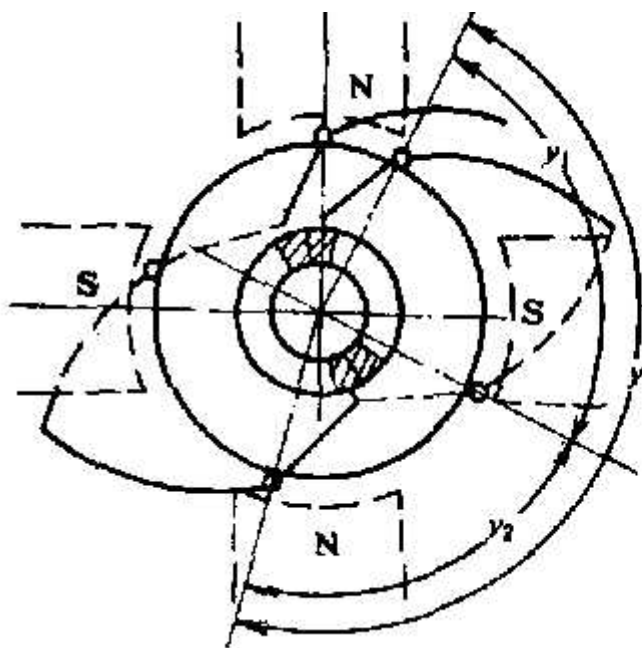
- 目的：使电刷间导出的电势有最大值
 - 方法：与电势为零的元件所连接的换向片相连接
- 当导体转至交轴时，感应电势为零，电刷应与处于交轴位置的导体相连
- 如导体对称，则磁极的几何中心线处为电刷位置
- 换向绕组的绕组轴线、磁极轴线和电刷位置在同一位置上



2. 直流电枢绕组

2. 单波绕组

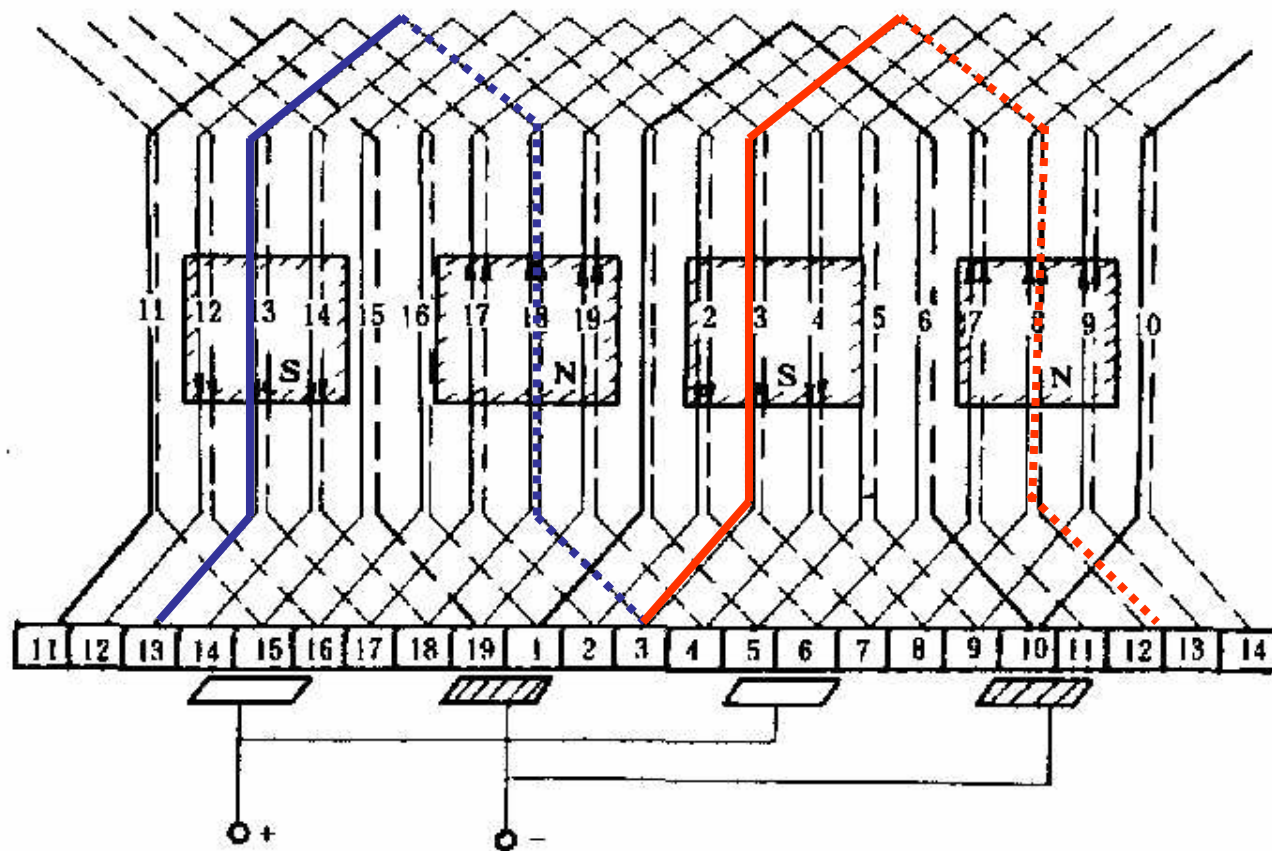
- 每一绕组元件的出发点和终端不在相邻的两换向片上，而相隔近似为一个极距
- 相邻两元件相隔近似一对极距
- 连接 p 个元件后回到出发元件的附近，相隔一个槽 $y = \frac{k \pm 1}{p}$

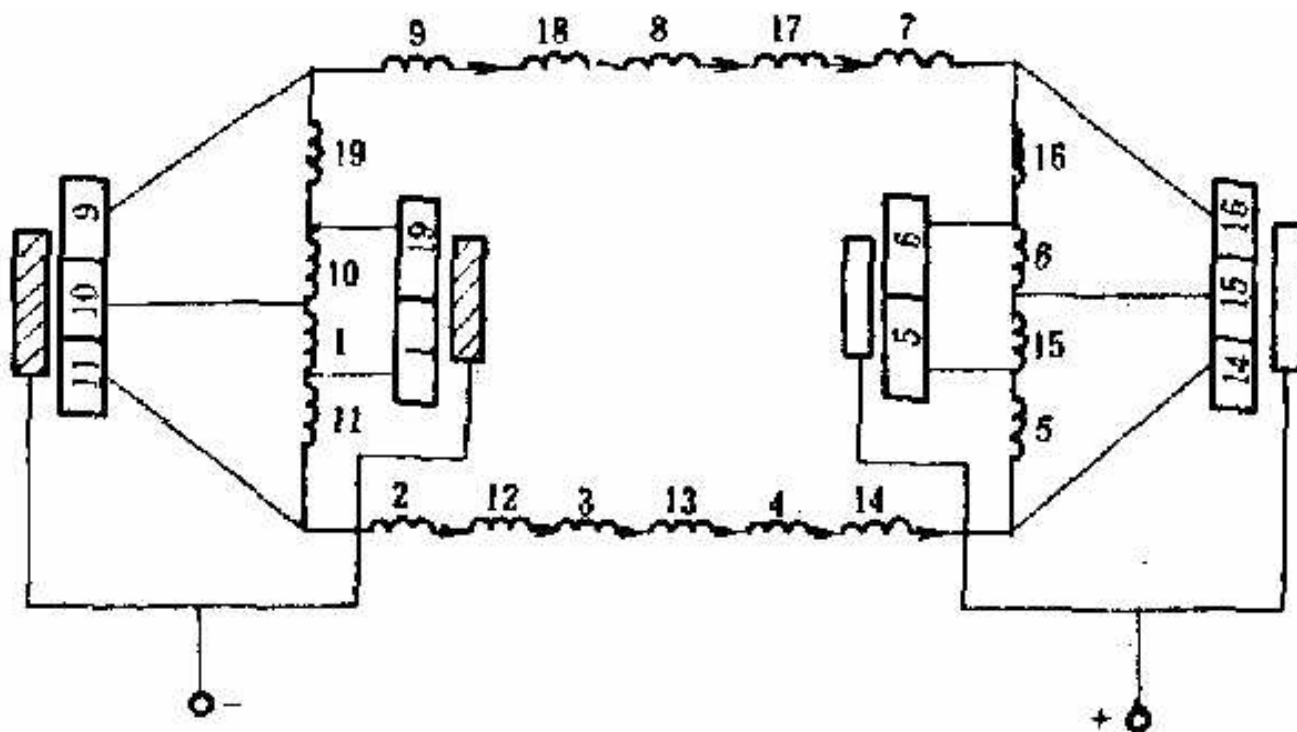


例：绕组19虚槽，四极

单波左行 $y = \frac{k-1}{p} = \frac{19-1}{2} = 9$

第一节距 $y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \varepsilon = \frac{19}{4} \pm \varepsilon = 5$ 第二节距 $y_2 = y - y_1 = 4$

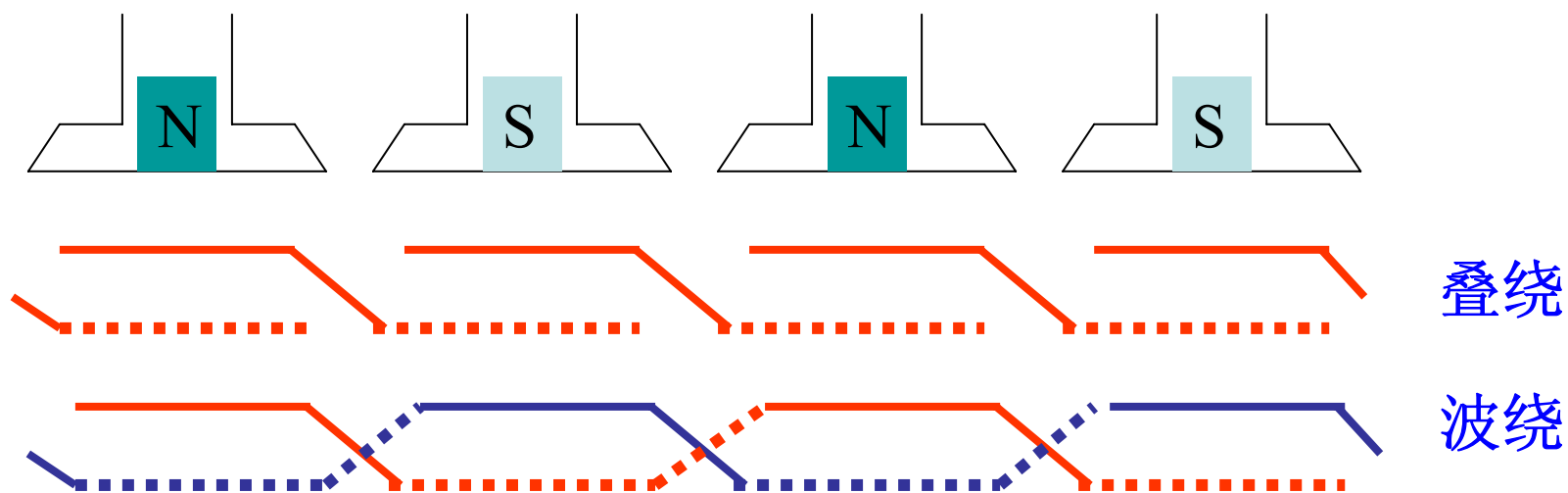




- 只有两条并联支路：所有 N 极下的导体并联为一支路，所有 S 极下的并联为另一支路。 $2a=2$
- 电刷数原则上等于 2 ，为降低电刷电流密度，可用 $2p$ 只电刷
- 电刷位置：应与电势为零的元件所连接的换向片相连

单叠绕组和单波绕组的差别

- **单叠绕组**：各个极面下上层的绕组元件构成一支路，并联支路数等于极数，电枢间电势较小，电枢电流较大，称并联绕组
- **单波绕组**：**N** 极下上层的绕组元件串联为一支路，**S** 极下的串联为另一支路，并连支路数恒等于2。电刷间电势较大，电枢电流较小，称串联绕组



3. 直流电机的磁场和电枢反应

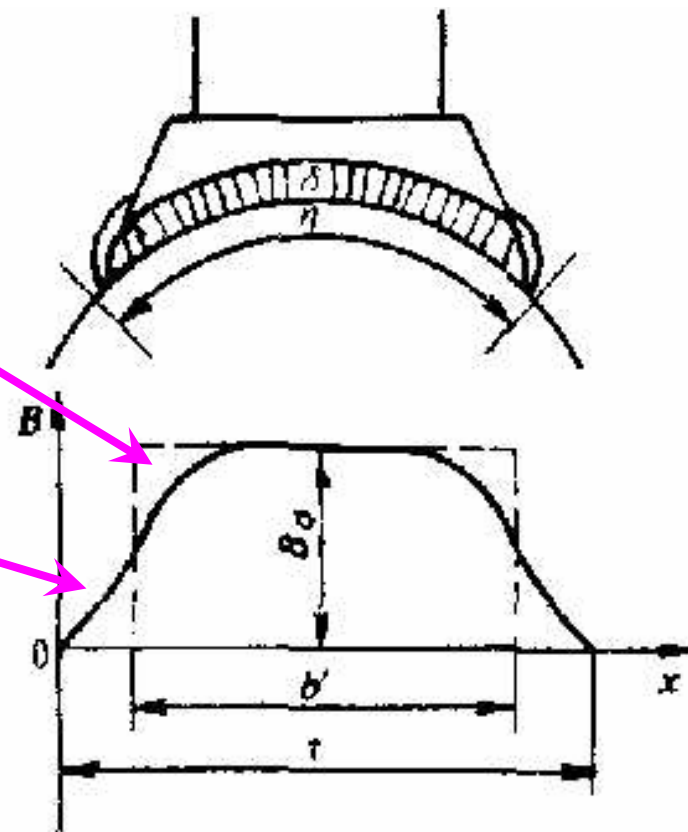
- 空载时直流电机的磁场
- 负载时电枢电流的磁场
- 交轴电枢反应
- 直轴电枢反应

I 空载时直流电机的磁场

- 由磁极的直流励磁电流产生，空气隙磁场不随时间变化，性质上是恒定磁场
- 空间上，忽略极面下的齿槽效应，沿极面均匀分布

空间上，非正弦分布，在导体中感应电势将包括有高次谐波。

边缘磁通



I 空载时直流电机的磁场

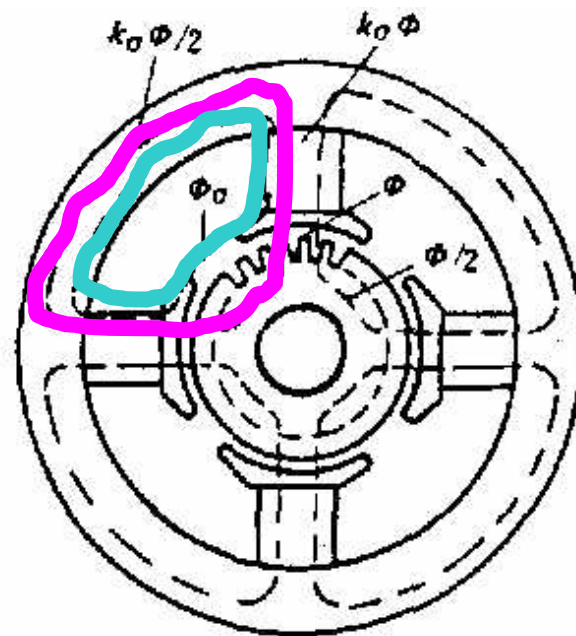
主磁通与磁极漏磁通

- **主磁通 Φ** ：产生感应电势和电磁转矩的有效磁通，通过空气隙，同时链接电枢绕组和励磁绕组
- **磁极漏磁通 Φ_σ** ：从磁极侧面逸出，只和励磁绕组链接
- **磁极磁通**：包括主磁通和漏磁通， $k_\sigma \Phi = \Phi + \Phi_\sigma$

场漏系数 $K_\sigma = 1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi}$

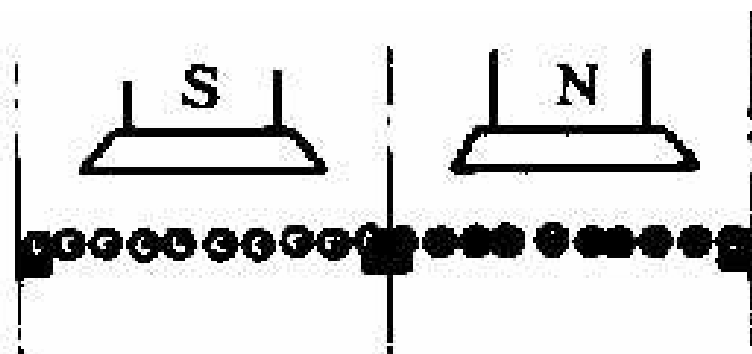
一般为1.15-1.25

- **电枢磁通**：主磁通的一半
- **定子磁轭磁通**：磁极磁通的一半

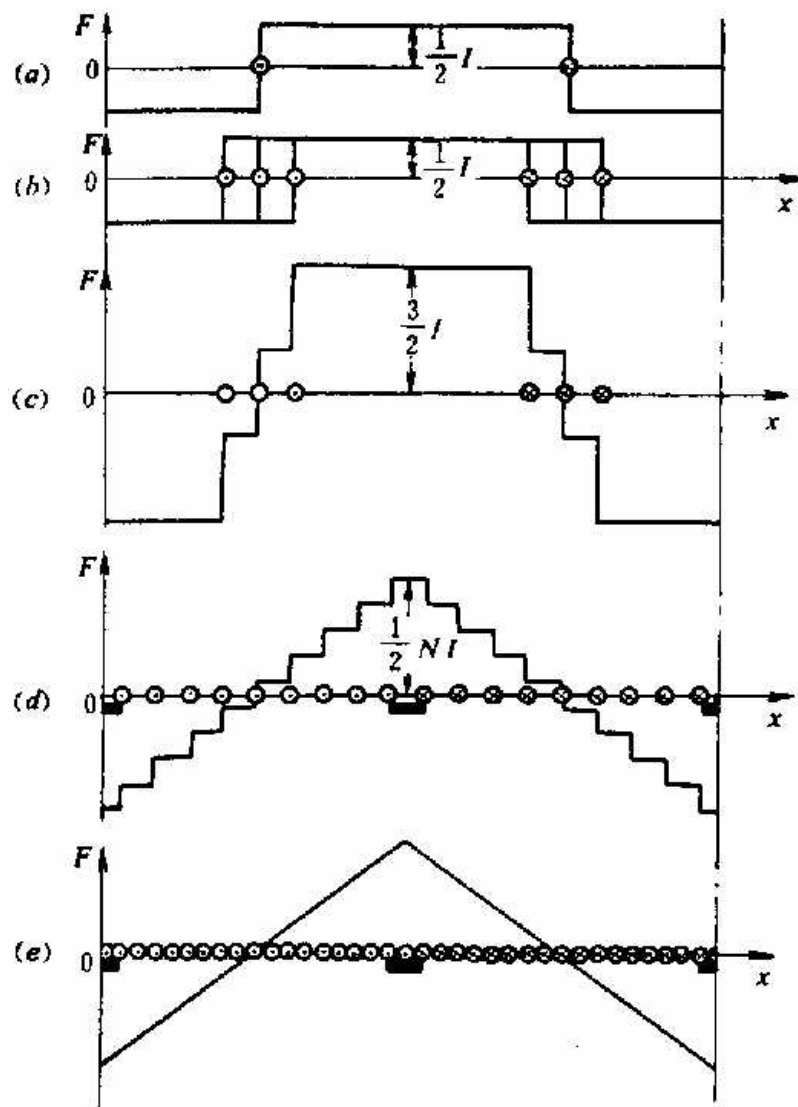


II 负载时电枢电流的磁场

- **电枢反应：**电枢磁势的存在使空气隙磁势的分布情况改变，从而使空气隙磁场分布情况改变
- 对于一定的电枢电流，空气隙磁场仍然是一恒定磁场，即不随时间变化
- 由于静止的电刷和运动的换向器的共同作用，电刷间连接的导体时刻在变化，但电刷间导体电流产生的磁势不变
- 电枢磁势和主磁极的相对位置一定。同步电机的电枢磁势和主磁极也相对静止，但其相对位置随负载功率因数而变化



II 负载时电枢电流的磁场



直流电机电枢绕组磁势波形

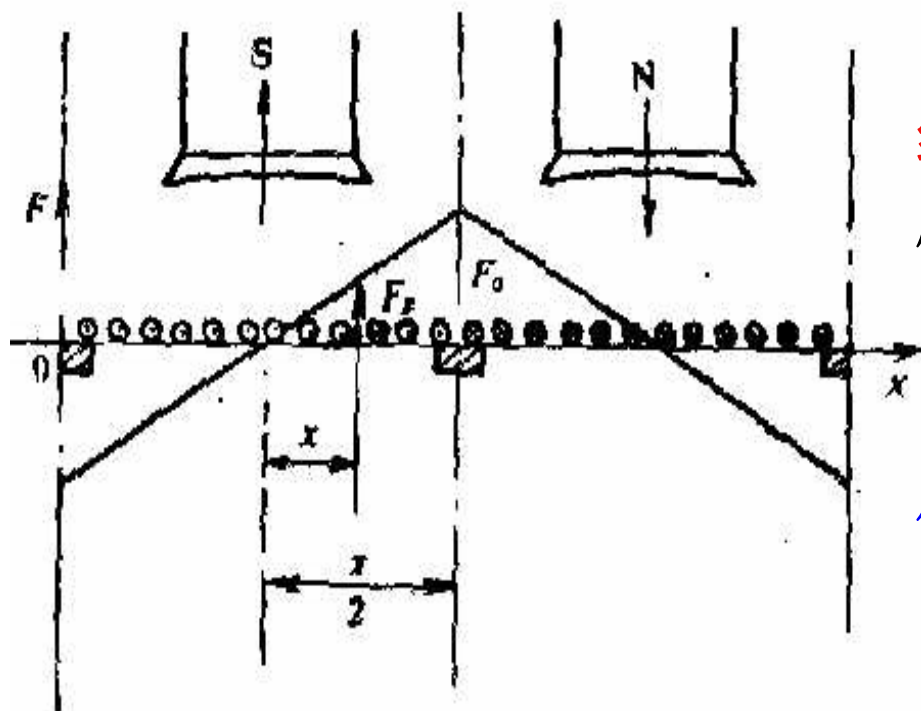
- 直流电机的电枢磁势是幅值固定的空间分布波，只是空间的函数
- 交流电机的电枢磁势是幅值随时间按正弦规律脉动的空间分布波
- 如沿电枢分布的线圈无限增多，则梯形波将趋近于三角形波

II 负载时电枢电流的磁场

任意点电枢磁势的计算

条件： 设电枢绕组的导体数为 N ，极数为 $2p$ ，则一个极距内的导体数为 $N/2p$ 。电刷电流为 I_a ，并联支路数为 $2a$ ，则流过每一导体的电流为 $I_a/2a$

$$F_{aq} = \frac{1}{2} \cdot \frac{N}{2p} \cdot \frac{I_a}{2a} = \frac{NI_a}{8pa}$$



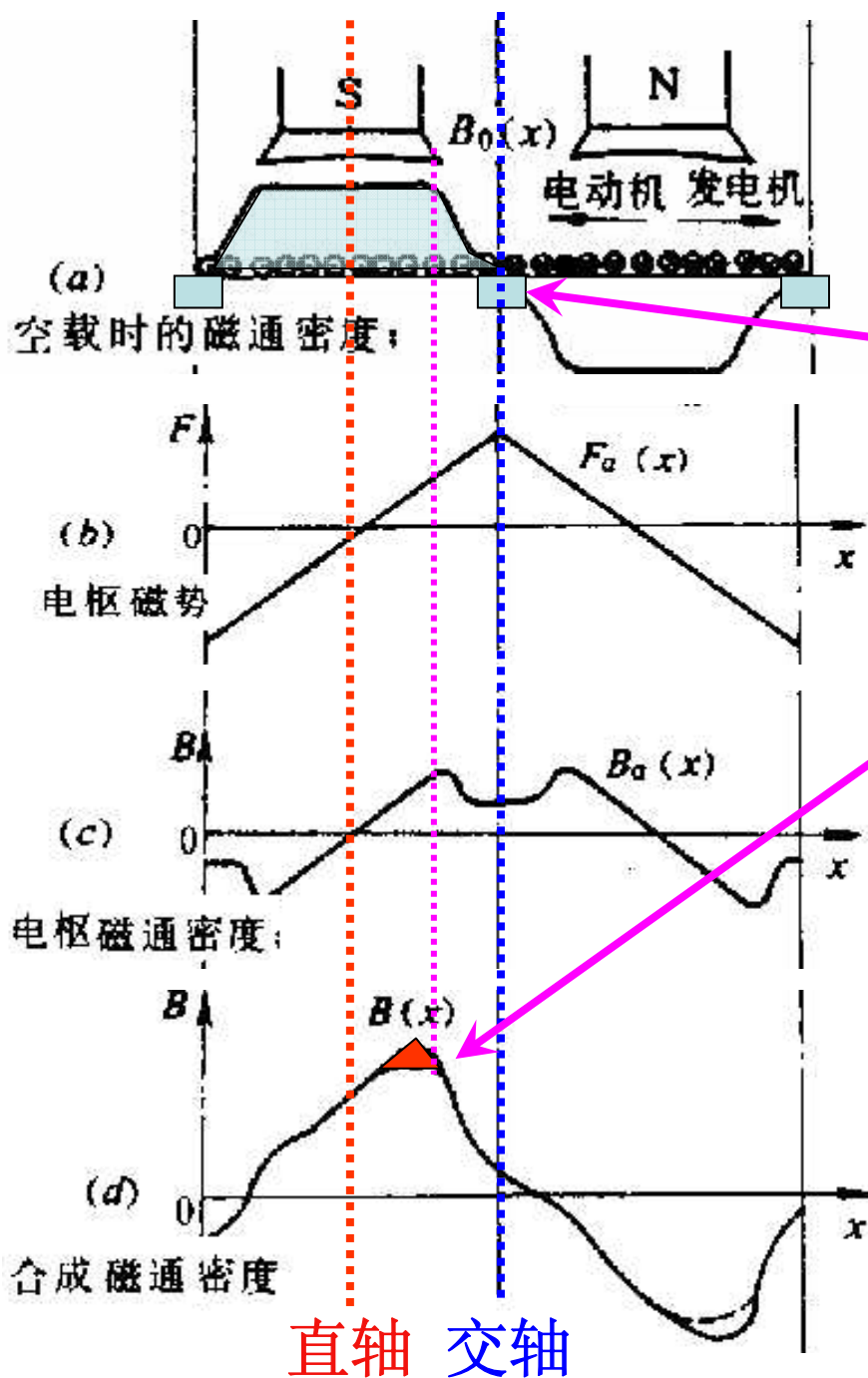
线负载 A ： 沿着电枢圆周每单位长度内的电流安培数

$$A = \frac{Ni_a}{\pi D_a} = \frac{NI_a}{2a} \frac{1}{2p\tau} = \frac{NI_a}{4pa\tau}$$

任意点电枢磁势：

$$F_{ax} = Ax$$

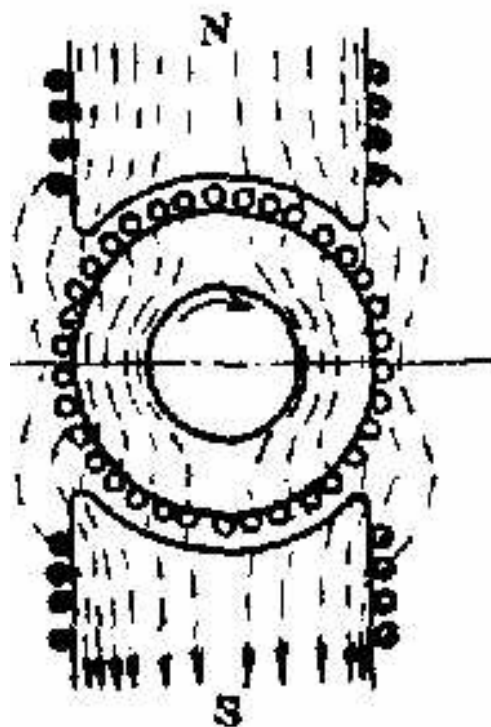
III 交轴电枢反应



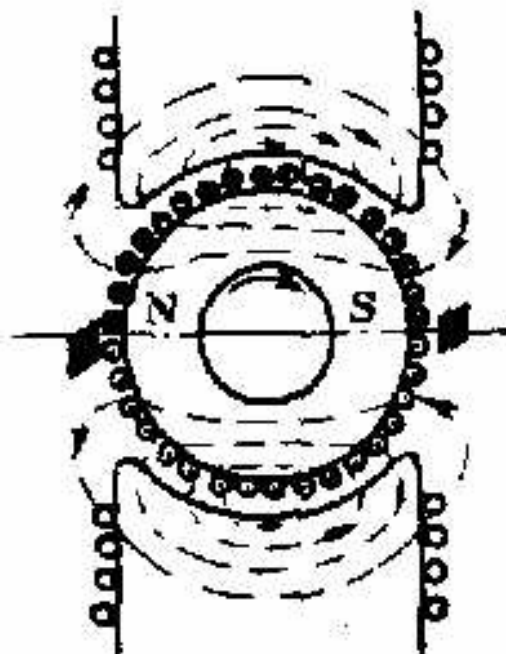
电枢磁势位置取决于电刷位置，电刷位于**交轴**，电枢磁势轴线也在交轴，为**交轴电枢反应**。

交轴电枢反应对气隙磁场的影响：

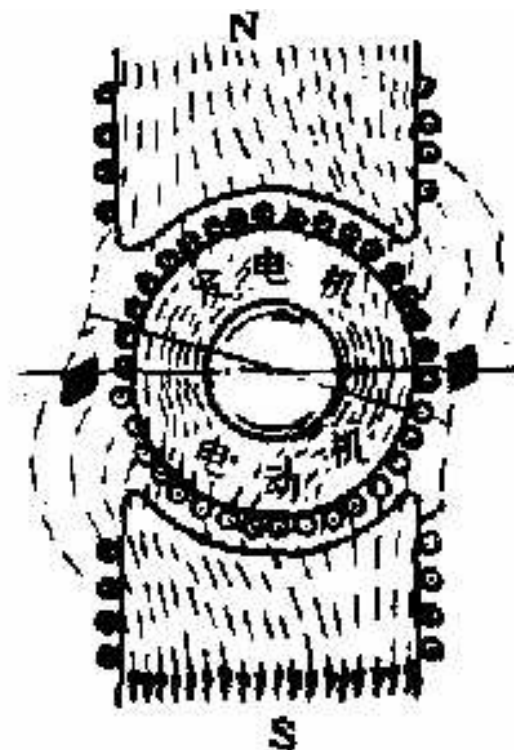
1. **极尖处**磁密最大，且由于其饱和程度的提高，饱和影响使**高峰**略有下降，即极面下的总磁通略**减小**，呈现**去磁**作用；
2. 使气隙磁场发生畸变，磁密分布不均匀；
3. 使交轴处的磁场不为零，妨碍线圈中的电流换向。



空载气隙磁场



电枢磁场



负载时合成磁场

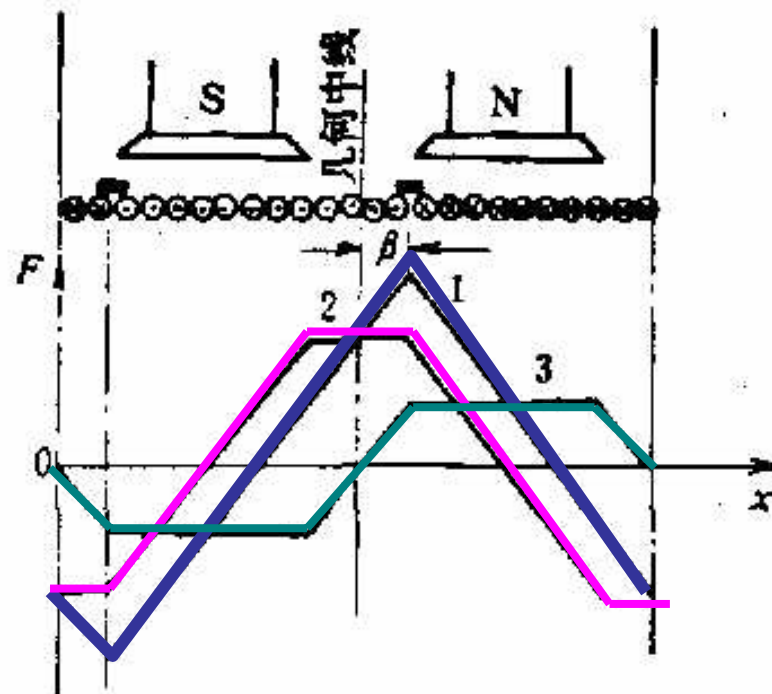
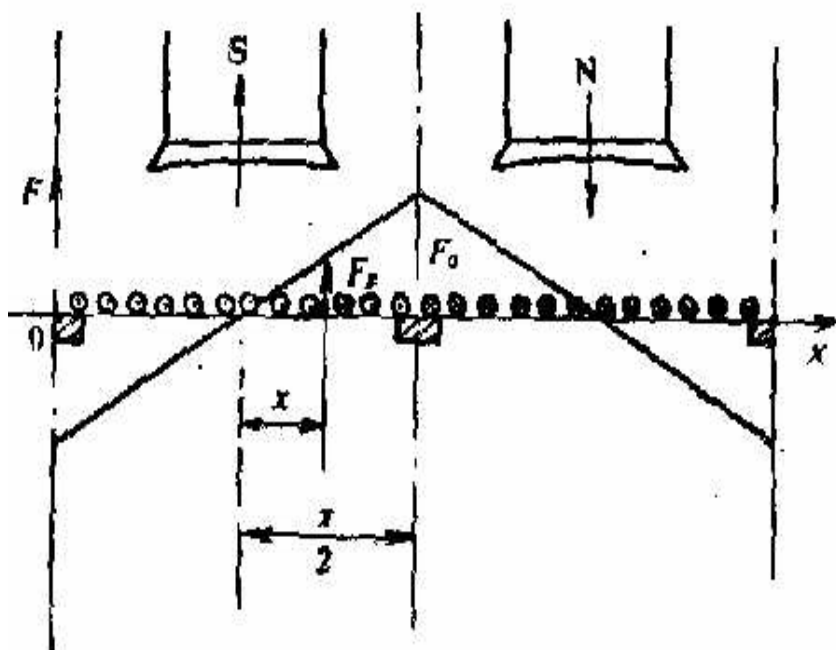
定义：电枢**进入**极面处的磁极极尖为**前极尖**，电枢**离开**极面处的极尖为**后极尖**

➤发电机的**前极尖**下磁通密度**削弱**，**后极尖**下磁通密度**增强**

➤电动机的**前极尖**下磁通密度**增强**，**后极尖**下磁通密度**削弱**

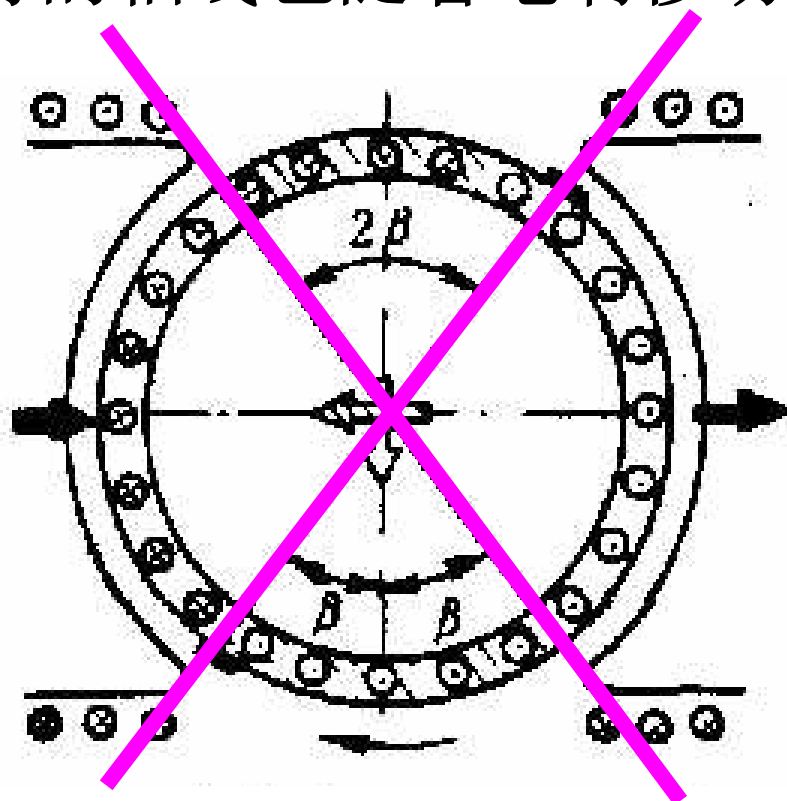
电刷位置对电枢磁势的影响

- 电枢磁势幅值的位置恰在导体中的电流改变方向处，亦即在导体通过电刷处。
- 如电刷和位于交轴的导体相接触，则电枢磁势的轴线就在交轴；如电刷移动，则电枢磁势的轴线也就跟着移动。
- 直流电机的电枢磁势轴线永远位于导体中的电流改变方向处（电刷位置），且在空间是静止不动的。



IV 直轴电枢反应

- 如电刷顺着发电机的旋转方向或逆着电动机的旋转方向移过一个角度 β ，则电枢电流的分布随之改变，电枢磁势的轴线也随着电刷移动。

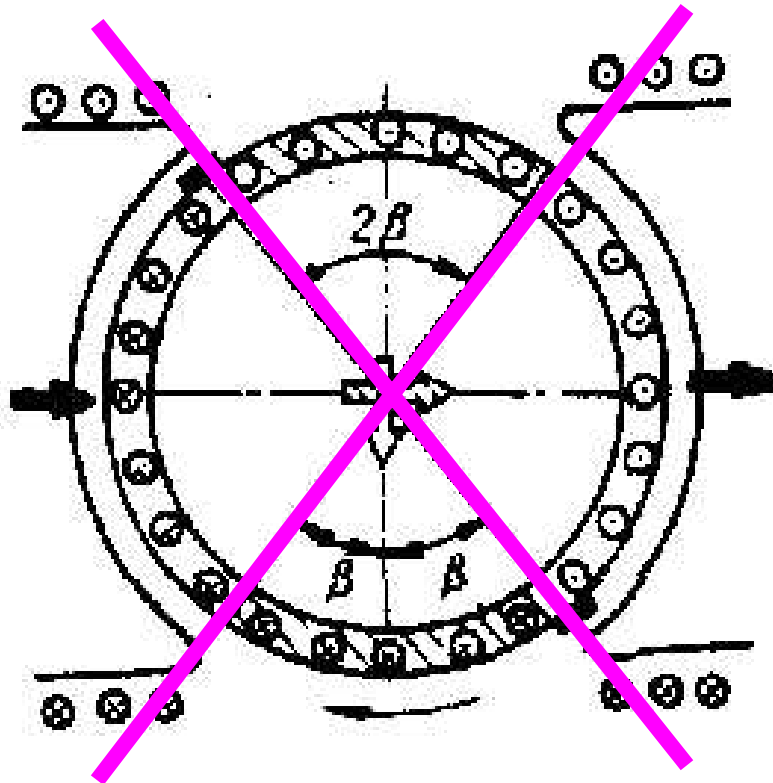


直轴分量为去磁作用

- 角度 2β 范围以外：
导体所产生的磁势作用在交轴，为交轴电枢反应。
- 角度 2β 范围以内：
导体所产生的磁势固定作用在直轴，称为直轴电枢反应，其方向与主磁极极性相反，使主磁通减弱，呈现去磁作用，将使电枢里感应的电势减小。

IV 直轴电枢反应

- 如电刷逆着发电机的旋转方向或顺着电动机的旋转方向移过一个角度 β ，则电枢电流的分布随之改变，电枢磁势的轴线也随着电刷移动。



直轴分量为磁化作用

- 角度 2β 范围以外：

导体所产生的磁势作用在交轴，为交轴电枢反应。

- 角度 2β 范围以内：

导体所产生的磁势固定作用在直轴，称为直轴电枢反应，其方向与主磁极极性相同，使主磁通减弱，呈现增磁作用，将使电枢里感应的电势增加。

IV 直轴电枢反应

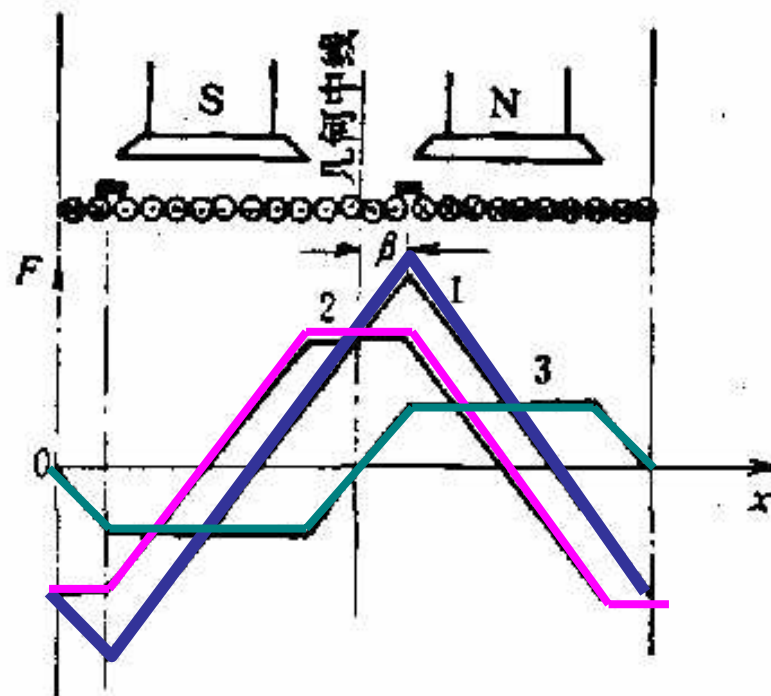
➤ 设电枢磁势的每极安匝数为 F_a ，则

- 直轴电枢磁势的幅值为 $F_{ad} = F_a \frac{2\beta}{\pi} = A\tau \frac{\beta}{\pi}$
- 交轴电枢磁势的幅值为 $F_{aq} = F_a \frac{\pi - 2\beta}{\pi} = A\tau \left(\frac{1}{2} - \frac{\beta}{\pi} \right)$

➤ 交轴电枢磁势的去磁作用，用等效直轴去磁安匝 F_{aqd} 表示，它与磁路的饱和程度有关，可近似与电枢电流成正比

➤ 有效的励磁磁势为

$$F_f = F_{f0} - F_{ad} - F_{aqd}$$



4. 电枢绕组的感应电动势和电压、功率平衡方程式

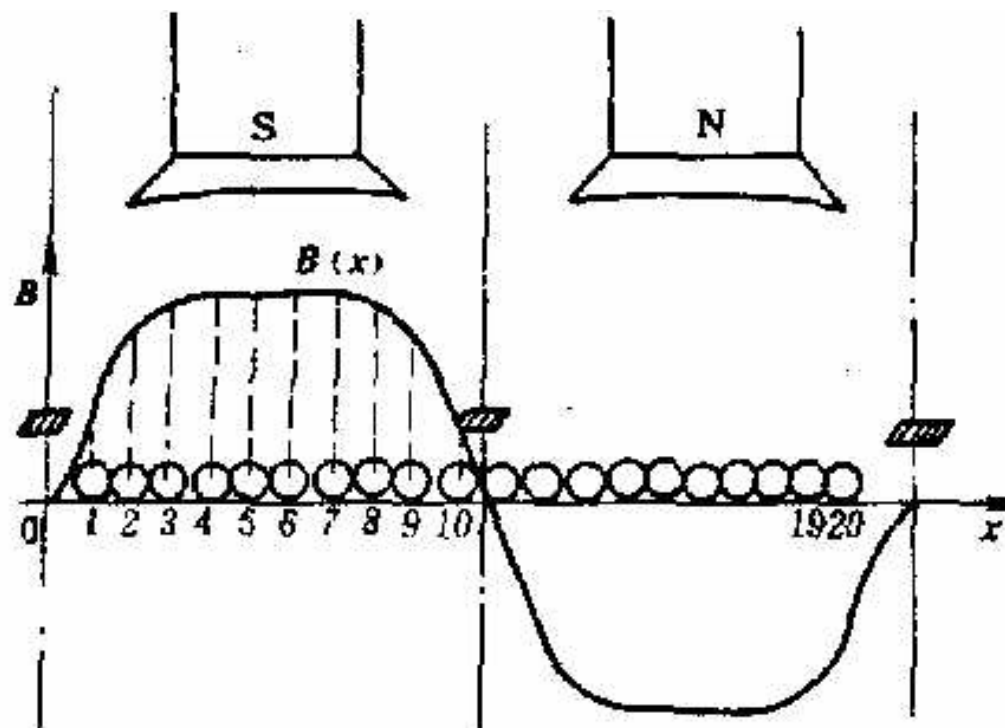
➤ 电枢绕组的感应电动势

➤ 电压平衡式

➤ 功率平衡式

I 电枢绕组的感应电势

- 电枢绕组的感应电势：电机正、负电刷之间的电势，即每一并联支路的电势。
- 位于电刷之间固定位置的各个导体的感应电势之和。



I 电枢绕组的感应电势

- 设电枢总导体数为 N ，有 $2a$ 条并联支路，则每一支路中的串联导体为 $N/2a$
- 电刷间的感应电势为每一支路中的串联导体的感应电势之和
- 设平均磁密为 B_{av} ，导体有效长度为 l ，切割速度为 v

$$E_a = \sum_{j=1}^{\frac{N}{2a}} e_j = \frac{N}{2a} e_{av}$$

$$v = \pi D_a \frac{n}{60} = 2p\tau \frac{n}{60}$$

$$e_{av} = B_{av}lv = \underline{B_{av}} \underline{l} \cdot \underline{2p\tau} \underline{\frac{n}{60}} = \underline{2p\Phi} \underline{\frac{n}{60}}$$

电动势常数 $C_e = \frac{1}{60} \frac{pN}{a}$

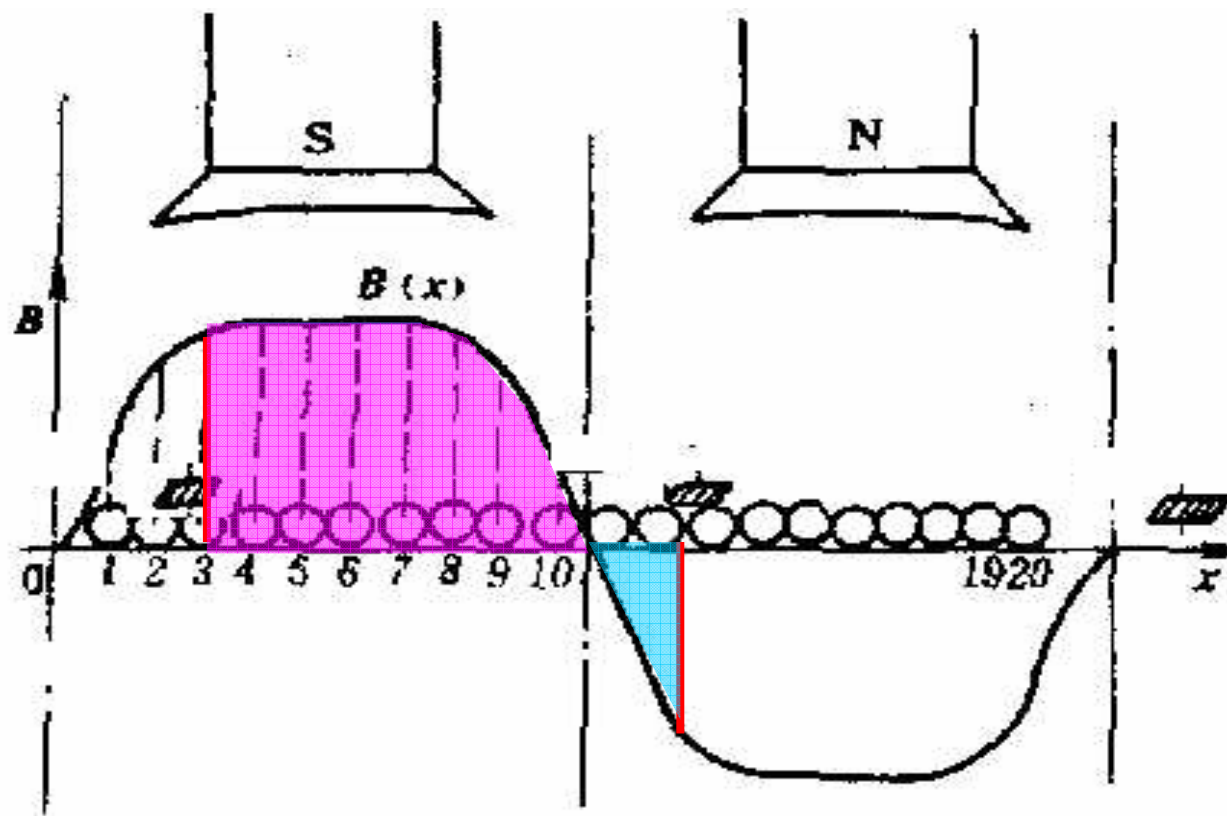
$$E_a = \frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi = \underline{C_e} n \Phi$$

I 电枢绕组的感应电势

- 直流电机的感应电势与每极磁通量及转速有关
 - 如将每极磁通量保持不变，直流电机的感应电势将和转速成正比
 - 如将转速保持不变，直流电机的感应电势将和每极磁通量成正比
- 电刷间的感应电势仅和极面下的总磁通量有关，而和极面下磁通密度的分布情况无关

$$E_a = \frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi = C_e n \Phi$$

I 电枢绕组的感应电势



电刷偏移后，极面下电刷间包含的磁通量减小

I 电枢绕组的感应电势

- 电刷在交轴，如果移动电刷位置，则支路中一部分导体的感应电势将因方向相反而互相抵消，导致电刷间电势 E_a 减小

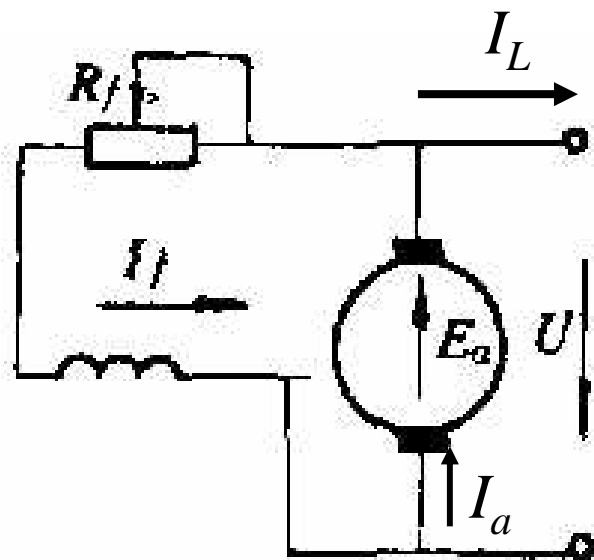
$$E_a = C_e \Phi n \quad \Phi \text{ 为相邻两电刷所连接的} \\ \text{导体间包括的每极有效磁通}$$

- 使用负载时的每极磁通，得负载时电刷感应电势 E_a
- 当负载时，由于电枢回路的电阻电压降，直流发电机电刷间的端电压 U 比负载时的电刷电势 E_a 小

II (a) 直流发电机的电压平衡式

$$I_a = I_L + I_f$$

$$E_a = U + I_a r_a + 2\Delta U$$

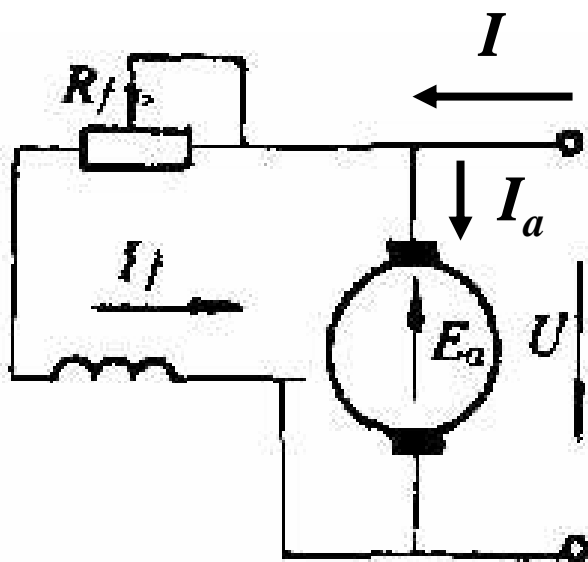


并励发电机

ΔU : 每一电刷的接触电压降

电刷接触电阻随电流的增大而减小，通常假定为常数，当用石墨电刷或碳石墨电刷时，取为**1V**

II (b) 直流电动机的电压平衡式



$$I = I_a + I_f$$

$$E_a = U - I_a r_a - 2\Delta U$$

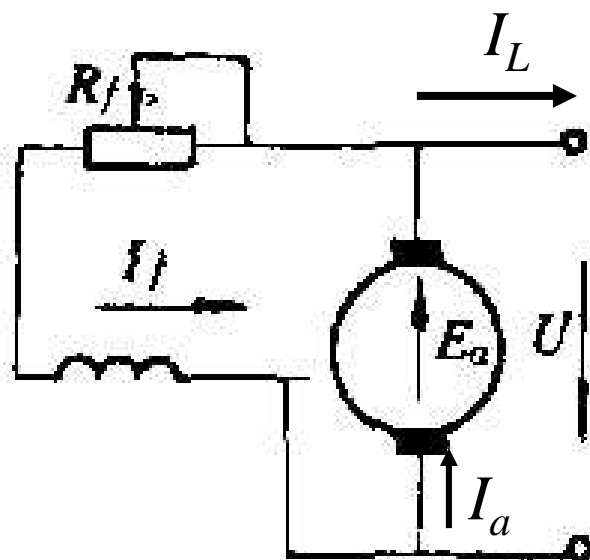
并励电动机

III (a) 直流发电机的功率平衡式

输入功率

$$P_1 = P_M + \underline{p_{mec}} + \underline{p_{Fe}} + \underline{p_{ad}}$$

空载损耗 $p_0 \rightarrow$ 不变损耗



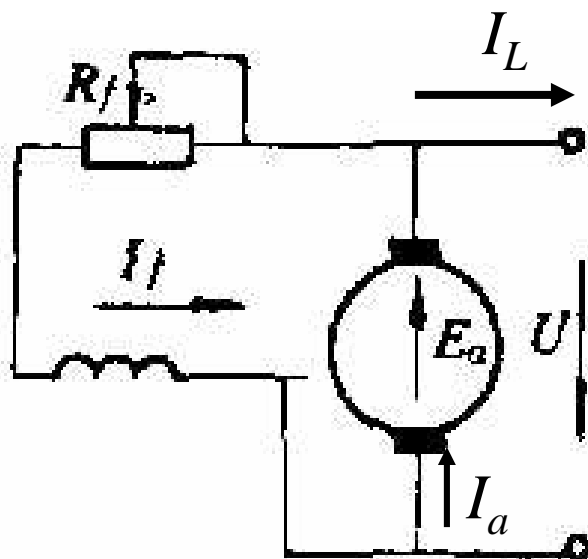
并励发电机

电磁功率

$$\begin{aligned} P_M = E_a I_a &= \underline{U I_L} + \underline{U I_f} + \underline{I_a^2 r_a} + \underline{2\Delta U I_a} \\ &= \underline{P_2} + \underline{p_f} + \underline{p_a} + \underline{p_b} \end{aligned}$$

负载损耗 \rightarrow 可变损耗

III (a) 直流发电机的功率平衡式



并励发电机

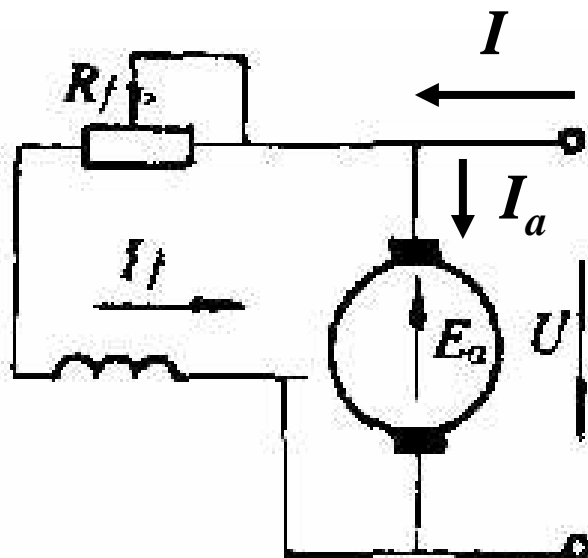
➤ r_a : 串接在电枢回路中各种绕组的总电阻，如电枢绕组、串励绕组和换向极绕组等

➤ 附加损耗产生 P_{ad} 的原因

- 电枢存在齿槽，使气隙磁通发生脉动，在电枢铁心、主极铁心和极靴表面中产生脉动损耗
- 电枢反应使磁场畸变产生的额外电枢损耗
- 电枢拉紧螺栓在磁场中旋转引起的铁耗
- 由换向电流产生的损耗

III (b) 直流电动机的功率平衡式

输入功率



并励电动机

$$\begin{aligned}
 P_1 &= UI = (E_a + I_a r_a + 2\Delta U)(I_a + I_f) \\
 &= \underbrace{E_a I_a}_{\text{电磁功率}} + \underbrace{I_a^2 r_a}_{\text{电枢铜耗}} + \underbrace{2\Delta U I_a}_{\text{电枢回路压降损耗}} + \underbrace{U I_f}_{\text{励磁功率}} \\
 &= \underbrace{P_M}_{\text{电磁功率}} + \underbrace{p_a}_{\text{电枢铜耗}} + \underbrace{p_b}_{\text{电枢回路压降损耗}} + \underbrace{p_f}_{\text{励磁功率}}
 \end{aligned}$$

电磁功率

$$P_M = P_2 + p_0 = P_2 + p_{Fe} + p_{mec}$$

$$\rightarrow P_1 = P_2 + p_{Fe} + p_{mec} + p_a + p_b + p_f + p_{ad} = P_2 + \sum p$$

5. 电枢绕组的 电磁转矩和转矩平衡方程式

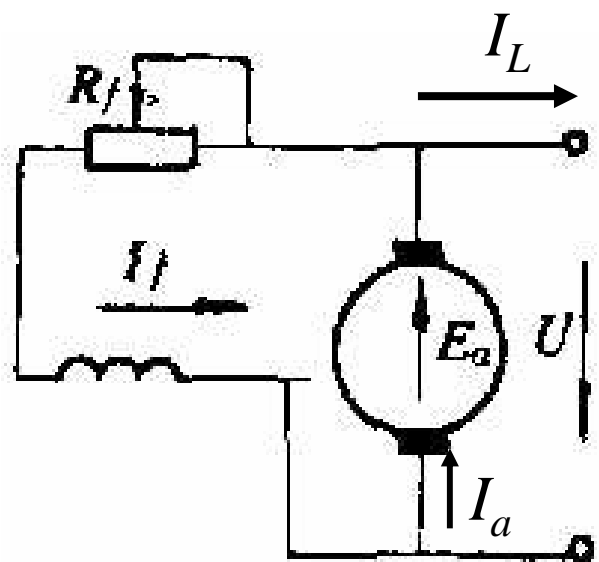
- 设流过电刷的电流为 I_a ，电枢导体中的电流是 $I_a/2a$
- 设电枢直径为 D_a ，电枢导体的有效长度为 l

$$F_j = B_j l \frac{I_a}{2a} \longrightarrow T_j = F_j \frac{D_a}{2} = B_j l \frac{I_a}{2a} \frac{D_a}{2}$$
$$\longrightarrow T_{av} = B_{av} l \frac{I_a}{2a} \frac{D_a}{2} = B_{av} l \frac{I_a}{2a} \frac{2p\tau}{2\pi} = \frac{p}{2\pi a} \Phi I_a$$

电枢总的电磁转矩 $T = \sum_{j=1}^N T_j = NT_{av} = \underline{C_T} \Phi I_a$

转矩常数 $C_T = \frac{1}{2\pi} \frac{pN}{a} \longrightarrow \frac{C_T}{C_e} = \frac{60}{2\pi} = 9.55$

直流发电机的转矩平衡



并励发电机

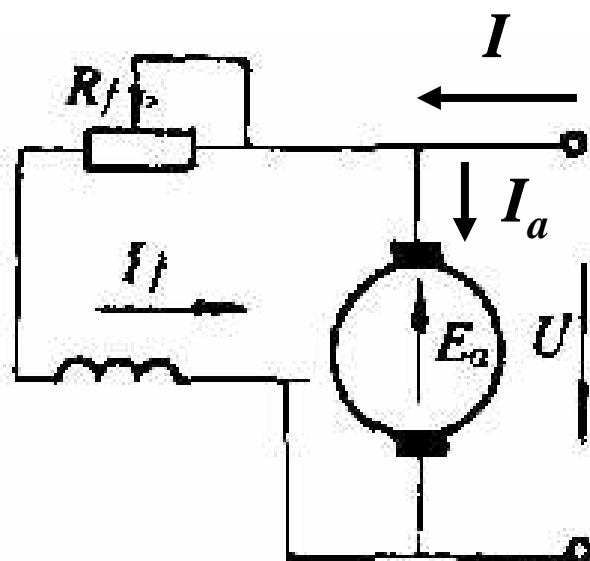
输入机械转矩 $T_1 = \frac{P_1}{\Omega}$

电磁转矩

$$T = \frac{P_M}{\Omega} = \frac{E_a I_a}{\Omega} = \frac{\frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi}{\frac{2\pi n}{60}} I_a = C_T \Phi I_a$$

→ $T_1 = T + \underline{T_0}$ 空载制动转矩

直流电动机的转矩平衡



并励电动机

电磁转矩 $T = \frac{P_M}{\Omega}$

空载制动转矩

$$T_0 = \frac{p_0}{\Omega} = \frac{p_{mec} + p_{fe} + p_{ad}}{\Omega}$$

→ $T = T_0 + \underline{T_2}$ 输出机械转矩

思考题

- 电刷之间的感应电势与某一导体的感应电势有什么不同
- 各种数量之间的相互关系：导体总数、换向片数、元件数、圈边数、槽数、每元件匝数、每一槽中并列圈边数

作业

➤习题: *p.* 329~330: 16-3、16-7~16-10